

■ Das wohltemperierte Revier

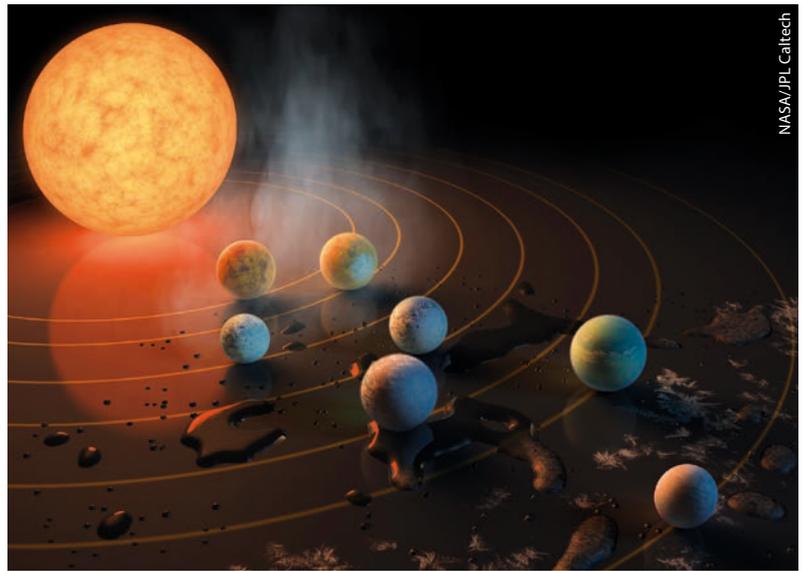
Neue Messungen und Analysen weisen auf eine felsige Struktur bei den Planeten des Sterns Trappist-1 hin. Die erdähnlichen Planeten könnten Atmosphären sowie flüssiges Wasser auf ihrer Oberfläche besitzen.

Dr. Yiannis Tsapras, Dr. Markus Hundertmark und Prof. Dr. Joachim Wambsganz, Astronomisches Recheninstitut (ARI), Zentrum für Astronomie der Universität Heidelberg (ZAH), Mönchhofstr. 12 – 14, 69120 Heidelberg.

Mehr als 22 Jahre nach der bahnbrechenden Entdeckung des ersten Planeten um einen sonnenähnlichen Stern, 51 Pegasi b [1], listet das Exoplanetenarchiv der NASA heute insgesamt mehr als 3600 Planeten in unserer Galaxis auf. Weitere 4500 Kandidaten warten auf Bestätigung. Jeder sechste Exoplanet umkreist seinen Stern nicht alleine, sondern befindet sich in einem Mehrfachsystem. Um Planeten mit unterschiedlichen Massen und Umlaufbahnen aufzuspüren, gibt es verschiedene Methoden. Die erfolgreichsten Techniken sind die Transitmethode, die Messung der Radialgeschwindigkeitsänderungen, der Mikrogravitationslinseneffekt und das Direct Imaging.

Beim Direct Imaging weisen Großteleskope wie das Very Large Telescope der Europäischen Südsternwarte (ESO) Photonen nach, die der Planet emittiert. Damit lassen sich besonders gut junge und massereiche Planeten mit sehr großen Bahnradien finden [2]. Für Planeten mit mittleren Abständen zu ihren Zentralsternen eignet sich eher der Mikrogravitationslinseneffekt. Das Planetensystem lenkt Licht eines weit entfernten Hintergrundsterns kurzzeitig ab, sodass sich dessen Helligkeit sehr charakteristisch verändert [3]. Aus diesen Messungen weiß man, dass im Durchschnitt jeder Stern der Milchstraße von mindestens einem Planeten umkreist wird [4].

Die Radialgeschwindigkeitsmethode beruht darauf, dass Stern und Planet um einen gemeinsamen Schwerpunkt kreisen. Dadurch verschieben sich die Spektrallinien des Zentralsterns abwechselnd zu längeren und kürzeren Wellenlängen. Dieser Doppler-Effekt verrät den



Die künstlerische Darstellung zeigt die sieben Planeten des Trappist-1-Systems.

Planet, beispielsweise auch den uns nächstgelegenen Exoplaneten Proxima Centauri b [5].

Am erfolgreichsten ist die Transitmethode, mit der im vergangenen Jahr auch die sieben Planeten des Trappist-1-Systems entdeckt wurden [6]. Sie nutzt die zeitweilige Bedeckung des Zentralsterns durch den Planeten aus und ist besonders empfindlich für große Planeten in engen Umlaufbahnen, die ihren Stern in Tagen oder wenigen Wochen umkreisen. Fortschritte in der Detektortechnik und weltraumgestützte Teleskope haben den Nachweisbereich auf kleinere, masseärmere Planeten erweitert. Bei einigen Exoplaneten ließ sich sogar die chemische Zusammensetzung der Planetenatmosphäre untersuchen. Aus Analyse und Vergleich der Spektren des Sterns während und außerhalb der Bedeckung weiß man, welche Wellenlängen die Planetenatmosphäre teilweise absorbiert und kann auf die zugehörigen Moleküle schließen [7].

Darüber hinaus ermöglicht die Methode durch das wiederholte Beobachten der Transits und ihrer zeitlichen Variation, weitere Planeten im selben System zu entdecken. Diese sorgen durch gravitative Wechselwirkung mit den bekannten Planeten dafür, dass die berechneten von den beobachteten Transit-Zeitpunkten abweichen [8]. Diese Methode der „Transit Timing Variation“ (TTV) benötigt sehr viel Beobachtungszeit, ist dafür aber sehr empfindlich. Im Trappist-1-System führte sie nach Hinweisen auf drei Exoplaneten durch eine gezielte Beobachtung mit dem Weltraumteleskop Spitzer dazu, insgesamt sieben erdähnliche Planeten zu entdecken – und damit eines der interessantesten bis heute bekannten Planetensysteme.

Der Zentralstern, der sich nur 39 Lichtjahre von uns entfernt im Sternbild Wassermann befindet, ist ein ultrakühler Zwergstern mit sehr viel geringerer Leuchtkraft als die Sonne. Die sieben Planeten

Tabelle Die sieben Planeten im Trappist-1-System scheinen alle erdähnliche Gesteinsplaneten zu sein (aus [9]).

Eigenschaften der Planeten im Trappist-1-System							
	b	c	d	e	f	g	h
Umlaufdauer in Tagen	1,15	2,42	4,05	6,10	9,21	12,36	18,76
Abstand zum Stern in AU	0,0115	0,0158	0,0223	0,0293	0,0385	0,0469	0,0619
Radius im Vergleich zur Erde	1,12	1,10	0,78	0,91	1,05	1,15	0,77
Masse im Vergleich zur Erde	1,02	1,16	0,30	0,77	0,93	1,15	0,33

– bezeichnet mit den Buchstaben b bis h – umkreisen den Zentralstern in 1,15 bis 18,76 Tagen (Tabelle). Im Vergleich zum Sonnensystem fallen ihre Bahnradialen alle deutlich geringer aus als die des Merkur. Durch diese große Nähe bleiben ihre abgeleiteten Oberflächentemperaturen im gemäßigten Bereich. Die Nähe zum Zentralstern legt darüber hinaus nahe, dass die Planeten gebunden rotieren: Wie bei Mond und Erde wenden sie dem Stern immer die gleiche Seite zu. Um dies nachzuweisen, müsste man aus den reflektierten Spektren der Planeten ihr Klima abschätzen: Bei einer gebundenen Rotation erwartet man eine heiße Tag- und eine kalte Nachtseite, die durch eine Dämmerungszone getrennt sind.

Die Massen der Planeten im Trappist-1-System ähneln jenen von Erde und Venus und sind Gegenstand einer aktuellen Studie [9]. Die Autoren nutzen in einem stochastischen Optimierungsverfahren 284 Messungen von Transits. Diese vergleichen sie mit rechenzeitintensiven Orbit-Integrationen, die sie mit sehr vielen verschiedenen Parameterkombinationen der Planeteneigenschaften erstellten. Mit dem besten „Fit“ der berechneten an die tatsächlich gemessenen Bedeckungszeiten gelang es, verlässliche Massen mit sehr viel kleineren Ungenauigkeiten als zuvor abzuleiten. Die Radien der Planeten sind durch die Abnahme der Helligkeit des Sterns beim Transit bekannt.

Die resultierenden Dichten der Trappist-1-Planeten erlauben Rückschlüsse auf die innere Struktur der Planeten. Aus einer statistischen Analyse mit idealisierten Zusammensetzungen von fels- oder wasserreichen Planeten schließen die Autoren auf eine felsige Struktur für die Planeten c und e. Die anderen Planeten sollen reich an flüchtigen Elementen sein: Sie könnten über Atmosphären, Ozeane sowie Eisschichten verfügen. Ihr Massenanteil von flüssigem Wasser beträgt bis zu fünf Prozent. Das ist hoch im Vergleich zur Erde mit weniger als 0,1 Prozent.

Das Wasser der Planeten befindet sich wahrscheinlich in unter-

schiedlichen Aggregatzuständen, da die verschiedenen Bahnradialen auch andere Oberflächentemperaturen zur Folge haben. Im wahrscheinlichsten Szenario weist Planet b eine dichte Atmosphäre mit einem Runaway-Treibhauseffekt auf. Wie bei der Venus steigen die Temperaturen stark an: Auf der Oberfläche des Planeten wird die Strahlung des Sterns in Wärme umgewandelt, welche die Atmosphäre aufheizt. Vermutlich befinden sich die Planeten e, f und g in der habitablen Zone und besitzen flüssiges Oberflächenwasser. Die größte Ähnlichkeit mit der Erde weist der Planet Trappist-1e auf.

Die Trappist-1-Planeten eignen sich aufgrund der vermutlich felsigen Struktur und der möglichen Atmosphären sowie dem Vorhandensein von Wasser hervorragend, um nach Anzeichen für biologische Aktivität außerhalb unseres Sonnensystems zu suchen. Dies ist eines der wichtigsten Ziele der nächsten Generation weltraumgestützter Teleskope und des European Extremely Large Telescope der ESO. Zukünftige Messungen sollen es ermöglichen, biologisch erzeugte Gase nachzuweisen – wenn es sie denn gibt. Eine biologische Aktivität auf der Planetenoberfläche beeinflusst die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre. Die Herausforderung besteht auch darin, eine klare und messbare Auswahl spektraler Merkmale zu identifizieren, die eindeutig auf biologischen Prozesse beruhen [10].

**Yiannis Tsapras, Markus Hundertmark
und Joachim Wambsganz**

- [1] *M. Mayor* und *D. Queloz*, *Nature* **378**, 355 (1995)
- [2] *B. Macintosh* et al., *Science* **350**, 6256 (2015)
- [3] *M. Dominik*, *Gen. Relativ. Gravit.* **42**, 2075 (2010)
- [4] *A. Cassan* et al., *Nature* **481**, 167 (2012)
- [5] *G. Anglada-Escude* et al., *Nature* **536**, 437 (2016)
- [6] *M. Gillon* et al., *Nature* **542**, 456 (2017)
- [7] *S. Seager*, *Space Science Reviews* **135**, 1 (2008)
- [8] *M. J. Holman* et al., *Science* **330**, 6000 (2010)
- [9] *S. L. Grimm* et al., *Astronomy & Astrophysics* (2018), DOI: 10.1051/0004-6361/201732233
- [10] *S. Seager* et al., *Astrobiology* **16**, 6 (2016)